

ESTUDIO COMPARATIVO DEL ENVEJECIMIENTO A LARGO PLAZO DE UNA  
MEZCLA CON ASFALTO MODIFICADO CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO.

MIGUEL ANGEL AGUDELO CENDALES

CODGO: 150871

STIVINSON MARTÍNEZ GOMEZ

CODIGO: 150864

TUTOR: JUAN GABRIEL BASTIDAS MARTÍNEZ

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS

BOGOTÁ D.C., COLOMBIA

2019

ESTUDIO COMPARATIVO DEL ENVEJECIMIENTO A LARGO PLAZO DE UNA  
MEZCLA CON ASFALTO MODIFICADO CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO.

PROPUESTA PARA PROYECTO DE GRADO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS  
BOGOTÁ D.C., COLOMBIA

2019



## Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

**Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

Jurado

Bogotá D.C., 08 de noviembre de 2019

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos agradecer en primer lugar a Dios, por mantener nuestra fe y nuestras ganas de sacar este proyecto adelante, a nuestras familias que siempre son un apoyo fundamental en nuestras vidas y sobre todas las cosas a nuestras madres que son las que luchan y mantienen en pie nuestros hogares.

Nuestros más sinceros agradecimientos a nuestro tutor que siempre estuvo hay para apoyarnos y brindarnos su conocimiento en cada etapa importante del proyecto. A nuestros compañeros de la especialización con los que cada día compartimos y fortalecimos lazos de compañerismo y amistad, generando gratos momentos de aprendizaje en la Universidad. ¡Muchas gracias!

## TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN .....	9
2. ABSTRACT .....	10
3. INTRODUCCIÓN .....	11
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
5. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....	13
6. OBJETIVOS.....	14
OBJETIVO GENERAL .....	14
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
7. ESTADO DEL ARTE .....	15
8. MARCO DE REFERENCIA .....	21
¿Qué es asfalto?.....	21
Asfalto Natural .....	21
Derivados pétreos:.....	21
Diferentes Tipos de Asfalto.....	21
Clasificación de los asfaltos .....	22
Propiedades físicas del asfalto.....	22
Composición química de los asfaltos .....	22
Asfáltenos:.....	22
Saturados .....	23
Resinas: .....	23
Aromáticos .....	23
Emulsiones asfálticas .....	23
Naturaleza reológica del asfalto .....	23
Grano De Caucho Reciclado .....	24
Composición química de la llanta .....	24
Proceso de adicción del GCR por vía seca. ....	25
PlusRide: .....	25
Proceso por vía húmeda .....	27
Tecnología por bacheadas .....	27
Tecnología terminal.....	28

9. MARCO TEORICO .....	29
10. MARCO LEGAL .....	30
11. METODOLOGÍA .....	31
12. RESULTADOS .....	40
12.1 Método Marshall .....	40
12.2 Módulo resiliente.....	43
12.3 Ensayo de Resistencia a la Tracción Indirecta RTI.....	47
13. CONCLUSIONES .....	49
14. ANEXOS.....	51
Registro fotográfico.....	55
15. BIBLIOGRAFIAS .....	57

### LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización del agregado .....	32
Tabla 2. Caracterización del asfalto modificado con GCR .....	33
Tabla 3. Propiedades generales asfalto AC 60-70.....	34
Tabla 4 Características para determinar porcentaje óptimo de la mezcla asfáltica MDC-19 .....	35
Tabla 5 Características para determinar porcentaje óptimo de la mezcla asfáltica MDC-19 modificada con GCR .....	36
Tabla 6 Resumen resultados Ensayo Marshall .....	43
Tabla 7 Resultados obtenidos del módulo resiliente (MR). .....	44
Tabla 8 datos generales del ensayo de la resistencia a la tracción indirecta (RTI). .....	47
Tabla 9 Diseño Marshall para los porcentajes de asfalto convencional (MDC-19)- 4.5%, 5.0% Y 5.5.....	51
Tabla 10 Diseño Marshall para los porcentajes de asfalto convencional (MDC-19)- 6.0% .....	52
Tabla 11 Diseño Marshall para los porcentajes de asfalto- caucho 6.0%, 6.5% y 7.0% .....	53
Tabla 12 Diseño Marshall para los porcentajes de asfalto-caucho 7.5 % .....	54

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de adición de GCR por vía seca [16].....	26
Figura 2. Proceso de adición de GCR por vía humedad. [16].....	28
Figura 3 Granulometría de agregados pétreos para la fabricación de mezclas asfálticas densas. ....	32
Figura 4. briquetas envejecidas al horno a 85°C .....	37
Figura 5- Ensayo de módulo resiliente a las briquetas con mezcla asfáltica convencional MDC-19 y mezcla asfáltica modificada con GCR no envejecidas y envejecidas. ....	38
Figura 6. Ensayo de tracción indirecta (RTI) después sumergidas en el baño maría a 25°C.....	39
Figura 7. Vacíos en el agregado mineral con respecto al contenido de asfalto.....	40
Figura 8. Evolución de vacíos de aire .....	40
Figura 9. Vacíos llenos de asfalto con respecto al contenido de asfalto. ....	41
Figura 10. Estabilidad Marshall con respecto al contenido de asfalto. ....	41
Figura 11. Flujo Marshall con respecto al contenido de asfalto.....	42
Figura 12. Relación E/F con respecto al contenido de asfalto. ....	42
Figura 13. Resultados obtenidos del módulo resiliente (MR).....	44
Figura 14. Resultados obtenidos del ensayo de la resistencia a la tracción indirecta (RTI) .....	47



## 1. RESUMEN

Este trabajo evaluó en el laboratorio la influencia del envejecimiento a largo plazo del comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica con asfalto modificado con grano de caucho reciclado (GCR), en comparación con una mezcla asfáltica convencional con asfalto CA 60-70. Para tal fin, se realizaron los dos diseños de mezcla por medio de la metodología Marshall con el objetivo de determinar los contenidos óptimos de asfalto. Posteriormente, se realizaron ensayos de laboratorio con el fin de evaluar la respuesta de los materiales ante la aplicación de carga monotónica (ensayo de resistencia a la tracción indirecta) y cíclica (ensayo de módulo resiliente). Los ensayos de caracterización mecánica se realizaron en muestras envejecidas a corto y largo plazo, a fin de evaluar el efecto del envejecimiento de las mezclas. Para el envejecimiento a corto plazo se fabricaron las mezclas y se sometieron a un envejecimiento en un horno a temperatura de 150 °C por un tiempo de dos horas. Para el envejecimiento a largo plazo, se fabricaron las mezclas y se sometieron en un horno a una temperatura de 85° C durante 5 días. Como gran conclusión, se reporta que el envejecimiento de las mezclas asfálticas produce un incremento en la rigidez de las mezclas. Sin embargo, las mezclas con asfalto modificado con GCR presentaron menor susceptibilidad al envejecimiento, pudiendo inducir un aumento en la vida útil del pavimento.

## 2. ABSTRACT

This work evaluated in the laboratory the influence of long-term aging of the mechanical behavior of an asphalt mix with modified asphalt with recycled rubber grain (GCR), compared to a conventional asphalt mix with CA 60-70 asphalt. To this end, the two mixing designs were made using the Marshall methodology with the objective of determining the optimal asphalt contents. Subsequently, laboratory tests were carried out in order to evaluate the response of materials to the application of monotonic load (indirect tensile strength test) and cyclic (resilient module test). The mechanical characterization tests were carried out on aged samples in the short and long term, in order to evaluate the effect of the aging of the mixtures. For short-term aging the mixtures were manufactured and subjected to aging in an oven at a temperature of 150 ° C for a period of two hours. For long-term aging, the mixtures were manufactured and placed in an oven at a temperature of 85 ° C for 5 days. As a great conclusion, it is reported that the aging of asphalt mixtures causes an increase in the rigidity of the mixtures. However, mixtures with GCR-modified asphalt showed a lower susceptibility to aging, which could lead to an increase in the useful life of the pavement.

### 3. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas que se presentan en los pavimentos asfálticos es el deterioro de su vida útil. Lo anterior, dado que los pavimentos se encuentran expuestos a las cargas inducidas por el tránsito y a las inclemencias del clima. En este sentido, en Colombia se ve la necesidad de estudiar sobre la modificación de las mezclas asfálticas, como una manera de optimizar las características y las propiedades para brindar soluciones a los inconvenientes de los pavimentos en la actualidad.

Por otra parte, es significativo tener en cuenta que en la ciudad de Bogotá actualmente se generan al año alrededor de más de tres millones 3'000.000 de llantas usadas, de las cuales más del 30 % son abandonadas en las calles y otras son quemadas a cielo abierto. Generando problemas sanitarios en la ciudad, enfermedades respiratorias, afectación al paisaje y deterioro de la capa de ozono. En este sentido, es necesario realizar estudios y prácticas que contribuyan al aprovechamiento de las llantas usadas, con el fin de mitigar considerablemente la contaminación en el medio ambiente [1].

El estudio de la adición de molienda de llanta para la modificación de las mezclas asfálticas tiene grandes beneficios, debido a los avances investigativos en la última década, con los cuales se ha identificado que estas mezclas modificadas son mucho más durables y reducen los costos de mantenimiento viales [2].

En la mezcla asfáltica, los asfaltos modificados con GCR presentan un buen comportamiento mecánico generando un aumento en su vida útil del pavimento. La presencia del GCR en la mezcla mejora la resistencia a fatiga, ahuellamiento y resistencia al envejecimiento, presentando mejores valores de estabilidad y flujo haciendo la mezcla se comporte mejor ante las cargas inducidas por el tránsito y a las variaciones de temperatura, conservando así su rigidez con respecto al envejecimiento.

Este trabajo tiene como objetivo evaluar el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica densa en caliente, de tipo MDC-19 con incorporación de asfalto modificado con grano de caucho reciclado (GCR) en condiciones de envejecimiento a corto y largo plazo, teniendo en consideración una mezcla asfáltica convencional fabricada con asfalto CA 60-70 (control). Para tal fin, el presente trabajo propone el diseño de dos mezclas asfálticas (MDC-GCR y la mezcla de control MDC-19) por medio de la metodología Marshall. Posteriormente la evaluación del comportamiento mecánico

por medio de los ensayos de resistencia a la tracción indirecta (RTI) y módulo resiliente (MR) en muestras envejecidas a corto y largo plazo.

#### **4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En los últimos tiempos uno de los principales problemas que presentan los pavimentos flexibles en Colombia son: la resistencia a las fisuras por fatiga, el ahuellamiento producido por las altas temperaturas, la falta de adherencia entre el ligante-agregados, entre otros. Lo anterior, genera una reducción en la vida útil y un incremento de los costos de mantenimiento [3].

Esta dificultad en las vías de pavimentación, se debe a que no se realiza una adecuada inversión en la ejecución de las obras viales, en su mayoría se escoge por construir pavimentos flexibles o asfálticos con respecto al pavimento rígido, puesto que su construcción es más económica; de igual forma estos se deterioran en periodos más cortos, que con el tiempo requiere trabajos de reparación y mantenimiento vial [3].

Es por lo que se hace de vital importancia estudiar el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas con asfalto modificado con GCR y la viabilidad de su implementación en las vías. Lo anterior, con el fin de mejorar la vida útil en los pavimentos flexibles, los problemas por ahuellamiento, la fisuración por condiciones térmicas y el envejecimiento por oxidación, entre otros [4].

## 5. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Los asfaltos convencionales presentan una variación en sus propiedades con respecto al cambio de las temperaturas, por eso se han realizado numerosas investigaciones y ensayos para cambiar sus características adicionando diferentes tipos de materiales, como GCR, escorias, polímeros, residuos de construcción de demolición, desperdicios plásticos entre otros [5].

Actualmente se tiene la necesidad de desarrollar pavimentos asfálticos con un envejecimiento más lento, con una menor deformidad ante la afectación de las cargas producidas por el tránsito, soportar los cambios climáticos, una mejor calidad del cemento asfáltico y una mayor durabilidad en el ciclo de vida de los pavimentos. Esto ha generado un desarrollo en las empresas y constructoras que trabajan con mezclas asfálticas, de mejorar las condiciones de las mezclas con la adición de algún material [5].

Uno de los factores más importantes es el sector económico donde se propone la mejora de las propiedades del asfalto modificado con la adición de polímeros, grano de caucho entre otros que ayuden a los cambios de temperaturas que sufre la mezcla asfáltica en los pavimentos, que aumente la capacidad de soportar las deformaciones y presente un aumento a la resistencia al envejecimiento, aumento la durabilidad y la vida útil en los pavimentos [5].

## 6. OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento mecánico de dos mezclas asfálticas densas en caliente fabricadas con asfalto convencional CA 60-70 y asfalto modificado con GCR en condiciones de envejecimiento a corto y largo plazo respectivamente.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcanzar el objetivo general de la presente investigación, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar los materiales (agregados y asfaltos) para la fabricación de mezclas asfálticas de tipo MDC-19, según los lineamientos del Instituto Nacional de Vías.
- Diseñar dos mezclas asfálticas tipo MDC-19 con asfalto modificado con GCR y CA 60-70 por medio de la metodología Marshall, con el objetivo de determinar los contenidos óptimos de cemento asfáltico.
- Evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas con asfalto modificado con GCR y CA 60-70, por medio de los ensayos de resistencia a la tracción y módulo resiliente, bajo condiciones de envejecimiento a corto y largo plazo, respectivamente.

## 7. ESTADO DEL ARTE

Cesar Díaz y Liliana Castro, realizaron un trabajo donde recopilan diferentes estudios a nivel global, donde se demuestra que la adicción con GCR, en las mezclas asfálticas son una alternativa de soluciones a las problemáticas que se presentan en el comportamiento mecánico de los pavimentos y que ayuda a reducir los impactos ambientales que generan las llantas usadas [6].

En conclusión, es importantes realizar un control en la elaboración de las mezclas manteniendo los porcentajes óptimos de material agregado, asfalto y grano de caucho reciclado. Esto con el propósito de reducir los costos de mantenimiento y obtener una mejora en las mezclas, para alcanzar los intereses de los proyectos en particular [6].

De igual manera con las diferentes investigaciones realizadas se demuestra que la adicción de GCR en mezclas asfálticas, ya sea por la vía seca o por la vía húmeda mejora en una buena proporción las propiedades los pavimentos flexibles [6]

Jonathan Maldonado Osorio realiza una investigación de la importancia que tiene la adicción de GCR en las mezclas asfálticas, los beneficios económicos, mecánicos, ambientales y el desarrollo que ha tenido esta mezcla modificada en las obras viales que se han realizado [7].

Como gran conclusión vemos que, en Colombia, existe una gran problemática ambiental debido a la mala gestión que se está dando a la disposición de llantas usadas. Se puede decir que el aprovechamiento de este material y su aplicación en pavimentos asfálticos no ha sido el óptimo, esto se debe en gran parte a la falta de políticas públicas que reglamenten e incentiven el uso de este ligante como es el (GCR) en mezclas asfálticas. Los beneficios económicos generados por la implementación de esta tecnología se ven reflejados a largo plazo, ya que al sustituir materiales como los agregados finos por material reciclado, aumenta la vida útil del pavimento lo que permite que los tiempos entre mantenimientos sean mayores; según el estudio realizado por la universidad EAFIT, acerca de la viabilidad de implementación de asfalto caucho, y comparando su proceso de producción con una mezcla convencional, se consideró que el costo de implementación de mezclas de asfalto modificado con (GCR) es aproximadamente un 46 % más costoso que una mezcla de

asfalto convencional, pero que es posible reducir los costos totales de la mezcla en un 18% siguiendo parámetros estructurales [7].

F. Moreno, MC rubio, MJ Martínez-Echeverría Realizaron este estudio de investigación que contribuye al desarrollo y la evolución del proceso seco a través del análisis del efecto del tiempo de digestión (el tiempo de contacto entre el polvo de neumático y el asfalto y la cantidad de polvo de neumático en las propiedades de diseño de mezcla [8].

Como conclusión el uso de polvo de neumático modificador (CRM) en mezclas bituminosas adicionado mediante el proceso en seco no es tan ampliamente utilizado como el proceso húmedo. Sin embargo, este proceso tiene ventajas, tales como; el potencial de consumir cantidades de polvo de neumático, lo que resulta en un mayor ahorro de energía y recursos naturales. Este estudio de investigación contribuye al desarrollo y la evolución del proceso seco a través del análisis del efecto del tiempo de digestión (el tiempo de contacto entre el polvo de neumático y el asfalto) y la cantidad de polvo de neumático en las propiedades de diseño de mezcla. Los resultados del estudio evidenciaron que el tiempo de digestión no tenía ninguna influencia en la selección del contenido óptimo de aglutinante o en la compactación de la mezcla [8].

Así mismo se presentó un incremento en el porcentaje de polvo de neumático en la mezcla por lo cual se pierde densidad y aumenta su contenido de aire. Esto debido a las propiedades elásticas del caucho que produjeron un efecto de rebote en el esqueleto mineral, haciendo así que la mezcla se vuelva menos compacta. Estos resultados indican que existen dificultades de la compactación de la mezcla que se asocia directamente con la cantidad de polvo de neumático agregado y no con el tiempo de digestión usado en el proceso de fabricación. En consecuencia, el porcentaje de caucho de la miga máximo que se añade es del 1% del peso total de la mezcla [8].

Esto resulta en la incorporación de mayores cantidades de polvo de neumático, significa que una mayor cantidad de ligante debe ser añadido con el fin de garantizar que la mezcla haga buena cohesión [8].



La adición de polvo de neumático modificador en mezclas asfálticas a partir de neumáticos de desecho mejorado el rendimiento de mezclas bituminosas, les ayudó a resistir deformaciones. Respecto, los resultados obtenidos para las mezclas proceso CRM seco eran mejores que los obtenidos para la mezcla de referencia que utiliza el betún de alto rendimiento [8].

Xiomara Vargas y Fredy en este estudio realizan una investigación del efecto del envejecimiento en los asfaltos, con el fin de estudiar este fenómeno que ocurre en los pavimentos y comprender su afectación, los estudios reflejan que inicialmente se presenta un endurecimiento físico y que afecta considerablemente la durabilidad y las propiedades de los asfaltos. [9].

Se concluye que para futuras investigaciones se hace interesante el estudio de nuevos materiales que modifiquen el asfalto, que permitan mejorar las propiedades reológicas y que permita una mejora durabilidad en los pavimentos. La nanotecnología a nivel mundial se encuentra en perfeccionamiento y en Colombia se han realizado muy pocas investigaciones sobre ello, por eso la importancia estudiar estos asfaltos [9].

Carrizales Apaza, José Javier, enfocados en la preparación de un nuevo diseño de una mezcla asfáltica modificada con GCR, donde plantean una solución al problema que generan las llantas usadas, para brindar una solución a los problemas que ocurren en la capa de rodadura con mezclas asfálticas [10].

Se concluye que se debe seguir estudiando los efectos del GCR en mezclas asfálticas, ya que el caucho tiene en su composición química elementos que hacen más durable y resistente al neumático en conjunto. Así como también probar el uso de otros compuestos químicos en la mezcla asfáltica [10].

De igual forma Incentivar y apoyar a los establecimientos que reciclan llantas usadas y que le dan un aprovechamiento al grano de caucho. Debido a que el GCR se puede usar en la elaboración de asfaltos modificados y otros productos de aprovechamiento, siendo un aporte para la reducción de la contaminación del medio ambiente [10].

Según los resultados una mezcla asfáltica modificada con GCR no representa una mejora en el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica, con ninguno de los diseños que realizaron en el laboratorio, ya que los valores que obtuvieron del método Marshall están por debajo de las normas establecidas [10].

La estabilidad de los asfaltos modificados con caucho reciclado de llanta está por debajo del Asfalto Convencional e incluso que las normas establecidas. Esta disminución en la estabilidad del asfalto aumenta las fallas por fatiga que se produce en las vías asfaltadas [10].

Jesús Antonio Forero López llevo a cabo la caracterización entre la mezcla asfáltica y de grano de caucho por el de acuerdo al ensayo Marshall, en donde cada muestra compacta la somete a los diferentes ensayos: ensayo estabilidad y flujo, análisis de las densidades y de los vacíos e identificación del peso específico de las briquetas determinando así el contenido óptimo de asfalto para los dos tipos de mezcla MDC-12 Y MGDC-19 [5].

Se concluye que En la mezcla de MDC-12 podemos observar que la dosificación de asfalto que más cumple con los requerimientos de la norma es 5% y que en la mezcla de MGCR-19 podemos observar que la dosificación de asfalto que más cumple con los requerimientos de la norma es 5.5% [5].

Luis Fernando Varón Realizo una mezcla asfáltica modificada con GCR, para una gradación TIPO 1, según las especificaciones técnicas del IDU – Sección 560-11, para identificar las características y el comportamiento de esta mezcla asfáltica modificada [11]

Realizado el método Marshall para la mezcla asfáltica modificada con GCR se determinó un óptimo de 8.2 % de contenido de asfalto, con este contenido de asfalto evidencia un buen comportamiento a las pruebas realizadas como resistencia a la humedad, al ahuellamiento y al módulo resiliente [11].

Se llega a la conclusión que, realizado el ensayo a tracción indirecta, la mezcla asfáltica modificada con GCR, gradación tipo 1 presenta una baja susceptibilidad a los daños producidos por el agua, la cual cumple con las especificaciones IDU-560-11 [11].

Armando Villamizar, Ingrid Ladino y Juan Rosas, realizaron un diseño de una mezcla asfáltica adicionando GCR por medio de la tecnología GAP GRADE, mediante el equipo de deformación plástica, realizaron el ensayo con diferentes contenidos de asfalto- caucho sometiendo las briquetas, determinando la deformación producida, para así calcular los espesores de pavimentos adecuados para una mezcla asfáltica modificada con GCR. [12].

Como conclusiones evaluadas todas las estructuras finales se tomaron como diseño la de la ASSHTO-93 ya que da un promedio con respecto al método SHELL e instituto del asfalto, con los otros métodos dan unas estructuras muy bajas, sobre todo en el espesor de la capa asfáltica, que no cumplen con las especificaciones [12].

Fredy Goicochea Fernández, presenta la investigación realizada en Chachapoyas, donde realizo el comportamiento mecánico que genera la adicción de GCR utilizando un asfalto 60/70, mejorando sus propiedades y características y reduciendo el costo de elaboración de una mezcla densa en caliente. Utilizo diferentes porcentajes de adicción de GCR entre el 10%,15% y 20%, en la mezcla de asfalto 60/70 elaboradas a temperaturas de 160°C, 180° y 200°, aplicándole los diferentes ensayos de penetración y punto de ablandamiento y con los resultados se pudo apreciar que el asfalto modificado con GCR presenta un aumento a la resistencia a las deformaciones, soporta los cambios de temperaturas y aumenta su rigidez manteniendo la elasticidad [13].

Se concluye que la adición de GCR al asfalto PEN 60/70 en las mismas condiciones de fabricación de las mezclas asfálticas; evidencia que cuanto menos es el porcentaje de caucho existente en la mezcla, el asfalto se vuelve más blando y cuanto mayor el porcentaje de caucho existente en la mezcla, el asfalto se vuelve más rígido. Las mezclas asfálticas producidas para la investigación; se obtuvo que dos no cumplen las especificaciones para los asfaltos con grano de caucho; que contienen 20 % de caucho, producidas a 160 °C y 180 °C. El comportamiento físico - mecánico del asfalto PEN 60/70, es mejorado con la molienda de las llantas usadas; respecto a que soporta los cambios climáticos, aumenta su cohesión y su impermeabilidad; garantizando un buen desempeño de la capa de rodadura del pavimento [13].

Jaime Francisco García Burgos presento este estudio que se basa principalmente en identificar la influencia que tiene la adicción de GCR en las mezclas asfálticas. El cual consiste en elaborar una serie de briquetas, elaboradas en caliente a unas temperaturas de 140° y 170°, luego se realizó el ensayo del método Marshall, determinado así los valores de estabilidad y flujo, de gran importancia en la investigación [14].

Una de las principales conclusiones fueron los cambios el asfalto modificado con GCR presenta un incremento en su volumen, incrementando los vacíos en el agregado y generando una mayor porosidad en el pavimento, los agregados en la mezcla asfáltica con GCR necesitan mayor asfalto para así lograr un recubrimiento total de las partículas. Al revisar precios unitarios en cuanto al costo de materiales para mezclas asfálticas se logró identificar que la mezcla con adición de GCR no representa un incremento significativo en su elaboración, obteniendo entonces una viabilidad económica para su uso y además cabe resaltar que se planteó su estudio inicialmente para mitigar y reducir daños ambientales causados con el desperdicio indiscriminado que se encuentra de estos materiales en las principales fuentes hídricas y las vías de la ciudad de Cartagena [14].

Danilo Sebastián Vega Zurita realizó el estudio de la adicción de grano de caucho en asfaltos convencionales por la vía seca, de igual manera utilizó el método Marshall con las briquetas de asfalto modificado con grano de caucho por la vía seca utilizando el 1%, 2% y 3 % de grano de caucho, reemplazando una parte de los agregados finos. Realizada la evaluación de los parámetros de estabilidad y flujo, se obtuvo que solo con el 1 % se obtuvo el cumplimiento de las especificaciones Marshall [15].

Las conclusiones más importantes del documento son que la Estabilidad evidenció valores superiores en la mezcla con el 1% que con las otras dos mezclas del 2 y 3% respectivamente, con lo cual podemos evidenciar que, al adicionar más GCR la estabilidad se reduce. La estabilidad de la mezcla patrón es ligeramente superior con 5499lb a la de la modificada con el 1% de caucho que fue de 4800 lb, sin embargo, se debe tener presente que una mezcla con estabilidad muy alta tiende a ser muy rígida o frágil, sin embargo, las dos cumplen la estabilidad Marshall para un asfalto de tráfico pesado. Observamos que con el 6,6% de contenido de asfalto, las mezclas con el 1% de GCR, cumple para la estabilidad, flujo y vacíos con aire y las mezclas del 2 y 3% de caucho no cumplen ninguno de estos parámetros [15].

## 8. MARCO DE REFERENCIA

¿Qué es asfalto?

El asfalto es una sustancia de un color oscuro y se presenta de forma líquida, semilíquida o sólida, se deriva principalmente de hidrocarburos originario de yacimientos naturales, se obtienen de los residuos del crudo de petróleo por extracción o destilación, usualmente se emplea para la construcción de carreteras.

Hablando a grandes rasgos el asfalto, es un producto negro, viscoso, pesado, sólido y bastante brillante, que con el aumento de la temperatura pasa de un estado sólido a un estado líquido, y se utiliza para diferentes obras civiles y en la ingeniería como tal. sus primeros usos datan del año 3200 A.C, en Tell asmer, donde se ve que los sumerios emplearon el asfalto pegando ladrillos, para pavimentación interiores entre otros.

El asfalto puede encontrarse de dos maneras:

Asfalto Natural: derivado del petróleo, en donde se evaporan los fragmentos volátiles, quedando como resultado las fracciones de asfalto, se presentan de diferentes maneras en la naturaleza como impregnado de rocas, mezclas con otro materiales y escurrimientos superficiales.

Derivados pétreos:

se consigue a través del proceso de destilación del crudo, a pesar de ello, en el petróleo no todas las veces hallamos asfalto, de igual manera se puede presentar que la aleación de nafta con asfalto es nula, por ende, el asfalto escasea en algunos tiempos. Para hacer mucho más fácil obtener asfalto, los petróleos se clasifican así:

1. Petróleos crudos de base asfáltica
2. Petróleos crudos de base parafínica
3. Petróleos crudos de base mixta

Donde, los petróleos crudos de base mixta no son óptimos, debido a su contenido de parafina.

Diferentes Tipos de Asfalto.

- Pavimentación.
- Riegos.
- Tratamientos y lechadas.

- Asfalto espumado, Micro aglomerados.

El mas importantes es el uso del asfalto como ligante que brinda una característica elástica y flexible.

#### Clasificación de los asfaltos

1. Asfaltos oxidados y soplados
2. Asfalto de curado lento
3. Asfalto emulsificador
4. Asfalto de un curado rápido
5. Asfalto de un curado medio
6. Asfaltos líquidos
7. Asfaltos solidos o duros

#### Propiedades físicas del asfalto:

Es un material aglutinante, presenta una buena resistencia, adhesivo, impermeables y muy estable, tiene la capacidad de soportar los esfuerzos, fluye bajo las inclemencias del clima y resiste las cargas permanentes. Es un material muy plástico por ende presenta una flexibilidad manejable a la mezcla de agregados. El color puede variar entre unas tonalidades de café a negro, y su estado puede variar de acuerdo con respecto a la temperatura o por emulsificantes.

#### Composición química de los asfaltos:

Es de gran importancia conocer que se componen los asfaltos para tener un buen control de sus propiedades y así poder dar soluciones al funcionamiento de los pavimentos, el asfalto está compuesto por heterocíclicos, aromáticos y paranínicos.

#### Asfáltenos:

son un grupo compuestos químicos orgánicos siendo compuestos muy pesados, con mayor punto de ebullición, estos compuestos son muy similares entre sí y presentan una mayor cantidad de anillos aromáticos que se unen entre sí por cadenas de parafínico con una polaridad alta. Son insolubles en los máltenos del mismo crudo del petróleo cuando se genera su destilación.

#### Saturados:

es un compuesto químico que presenta una cadena de átomos de carbono que se unen entre sí a través de enlaces simples contiene diferentes átomos de hidrogeno utilizando las valencias libres de otros átomos.

#### Resinas:

Son consideradas como la fracción del crudo se componen de solubles en alcanos tienen un bajo peso molecular y son retenidas por los absorbentes. Igualmente se presentan como un líquido viscoso oscuros, muy adhesivos y son agentes peptizantes para los asfáltenos.

#### Aromáticos:

Los aromáticos son de gran importancia ya que el asfalto se compone de un 40 % 0 60% de este y son la que menor peso molecular tienen, en los aromáticos predomina las moléculas con un peso de 300 a 200, que no son polares, tiene la capacidad de actuar como disolvente de cadenas hidrocarbonadas.

#### Emulsiones asfálticas:

Una emulsión asfáltica presenta un sistema heterogéneo con 2 fases, una que es el asfalto y otra que es el agua, se utiliza para el mejoramiento de vías existen dos tipos, de rompimiento rápido y de rompimiento lento, se puede usar cualquiera de las esto ya depende de las condiciones del clima o del requerimiento de un cliente.

#### Naturaleza reológica del asfalto:

la reología estudia las deformaciones y el flujo bajo la aplicación de carga y es de gran importancia conocer este aspecto en la industria del asfalto. La reología mide la deformación de los cuerpos que son entre sólido y elástico, líquidos y viscosos y es gran importación conocer la reología del pavimento ya que está muy relacionada con la durabilidad de los pavimentos.

## Grano De Caucho Reciclado

El GCR es el resultado de la molienda de los neumáticos usadas que ya cumplieron su uso, que de otra manera están llantas son abonadas en los parques, en espacio público, en rellenos etc. Generando una contaminación en el planeta, de igual manera hay gente que opta por almacenar este tipo de residuo contaminante, generando así una contaminación visual, proliferación de roedores o insectos, generando así problemas a la salud humana.

### Composición química de la llanta:

Se compone de caucho, acero y fibra textil que a su vez se compone por un conjunto de polímeros de gran peso molecular, como lo son el polisopreno sintético, el polibutadieno y el estireno-butadieno, todos derivados del hidrocarburo.

### Asfaltos Modificados.

Los asfaltos modificados entran al mercado por la necesidad de brindar una mejor resistencia en las mezclas asfálticas El asfalto modificado es el resultado de la adicción de un polímero o grano de caucho reciclado ya que estas sustancias presentan una mejor estabilidad con el tiempo y resisten las altas y bajas temperaturas, al ser incorporado en la mezcla asfáltica mejora sus propiedades mecánicas, reduciendo la susceptibilidad a la temperatura, humedad y a la oxidación.

De igual forma está demostrado que los asfaltos convencionales presentan un óptimo comportamiento de su comportamiento mecánico bajo diferentes variaciones de clima o de carga del tráfico, con transcurrir del tiempo, se presentan mayores volúmenes de tránsito, causando un aumento en el desgaste de los pavimentos actuales, por ello hoy en día deben soportar mayores y cargas, variaciones del clima. Por tal razón es importante el mejoramiento de las propiedades de las mezclas asfálticas y su resistencia.

Las investigaciones en el mundo demuestran que, al adicionar grano de caucho reciclado a las mezclas asfálticas, algunas características mejoran considerablemente, el GCR hace que la



mezcla sea más viscosa, hace que presente un comportamiento más flexible a bajas temperatura y menos flexibles a altas temperaturas, mejorando considerablemente la deformación permanente y mejorando la resistencia a la fatiga.

El GCR, se incorpora principalmente por dos métodos que son:

- Proceso de adicción por vía seca
- Proceso de adicción por vía húmeda

La diferencia que existe entre esto dos métodos es que en la vía humedad el GCR actúa como un ligante y en la vía seca el GCR actúa como parte del agregado fino, además de que uno actúa por la humedad y el no. Este proyecto se centró por la vía seca igual se presentan las dos definiciones.

Proceso de adicción del GCR por vía seca.

El proceso de adicción por vía seca es un método donde el GCR es incorporado directamente en la mezcla asfáltica, mezclándose primero con los agregados antes de incorporar el asfalto. Este método se realiza cuando se pretende adicionar el GCR como parte del agregado fino en la mezcla asfáltica, estos porcentajes de agregado fino de GCR varían entre el 1 y 3 % de la cantidad total de los agregados de la mezcla. Este proceso no requiere de algún equipo, solo se requiere adicionar la cantidad idónea de GCR y que se incorpore al momento debido para que se fusionen con los agregados a la temperatura requerida y posteriormente se adiciona el ligante.

En los estados unidos de Norteamérica existen dos tecnologías por la vía seca para la adicción de GCR que son la PlusRide y genérica.

PlusRide:

Esta tecnología se originó y se desarrolló en Suecia a finales de la década del 60 y se registró en U.S.A con el nombre de PlusRide. El GCR se adiciona en la mezcla asfáltica con tamaños que van desde 4.2 mm a 2.0 mm, los contenidos de vacíos de esta mezcla asfáltica por lo general están entre 2% y 4% y los contenidos óptimos de asfalto entran entre 7.5% y 9%.

Genérica:

Fue desarrollada por el doctor. Barry Takallou a finales de la década del 80 para desarrollar la producción de mezclas asfálticas en caliente con un tamaño de agregado considerable. Esta tecnología utiliza el GCR grueso como el fino emparejando la granulometría que se obtiene con la mezcla asfáltica mejorada, el porcentaje de GCR se ajusta para que se acomode la granulometría de los agregados. En cambio, el Plus Ride la granulometría del GCR se divide en una la fracción fina que es la que interactúa con el cemento asfáltico y la fracción gruesa se comporta como un agregado elástico en la mezcla asfáltica modificada.

Con este sistema, el porcentaje de GCR no debe ser mayor al 2 % del peso total de la mezcla para las capas de rodadura en los pavimentos.

Convencional:

Esta tecnología se desarrolló en España utilizando el GCR para el mejoramiento de mezclas asfálticas utilizando granulometrías que no involucran altos contenidos de asfalto, y que requieren menos porcentaje de GCR, con un 2% del peso total del material de agregado. Estas mezclas asfálticas se evaluaron dinámicamente con ensayos de la laboratorio y puestas en la vía presentando con muy buenos resultados.

El proceso por vía seca se utiliza para las mezclas asfálticas con granulometrías abiertas o discontinuas y densas.



Figura 1. Proceso de adición de GCR por vía seca [16].

Proceso por vía húmeda.

Por la vía húmeda, el GCR se mezcla con el asfalto produciendo una mezcla asfáltica modificada con GCR, funcionando como un ligante modificado. Es un proceso donde toca tener diferentes factores en cuenta ya que son definitivos en el resultado de las mezclas asfáltica modificada con GCR, estos son la textura, el tamaño y el porcentaje de GCR, el tipo de asfalto, la temperatura y el tiempo de mezcla. Los procesos húmedos más usados: el mezclado por bacheadas o tecnología McDonald, mezclado continuo y mezclado terminal.

Tecnología por bacheadas:

Este método se fundamenta en una elaboración de mezclas asfálticas con caucho por medio bacheadas. Las primeras aplicaciones se hicieron por medio del proceso húmedo y se realizaron por bacheadas y se basaron en la tecnología McDonald, que se desarrolló en la década del 60 por Charles McDonald, y patentada en la década del 70 por la Arizona Refining Company (ARCO). Hoy en día se encuentran diferentes patentes que se relacionan con la tecnología McDonald, muchas se han expirado y otras siguen vigentes. Tecnología continúa:

Es un proceso que se fundamenta en un sistema de elaboración de mezcla asfáltica con GCR de manera continua. El mezclado de esta tecnología es continuo y se desarrolló en Florida terminando la década de los 80 y se conoce como Florida Wet Process.

Para este proceso se utiliza un tamaño mínimo de 0.18 milímetros de GCR se mezcla con el asfalto en un proceso continuo. La tecnología de Florida a diferencia del proceso McDonald emplea bajos porcentajes de GCR, del 8 y 10%, el tamaño de partícula que se requiere es mucho más reducida es mucho más pequeña, de igual forma también se reduce la temperatura de mezcla y el tiempo de mezclado. El proceso por la vía húmeda de Florida a la fecha aún no ha sido patentado.

Tecnología terminal:

La tecnología terminal es un proceso por vía húmeda que combina el asfalto con el GCR, conservando el producto en el tiempo. Este proceso de mezcla asfáltica con GCR se puede almacenar ya que tiene la capacidad de durar en el tiempo y se mezcla en la refinería donde se produce asfalto por cualquiera de las dos tecnologías, continua o por batcheadas.



Figura 2. Proceso de adición de GCR por vía húmeda. [16].

## 9. MARCO TEORICO

En las investigaciones que se han realizado en las mezclas asfálticas modificadas con GCR, se determina que existen diferentes factores que se ven alterados en comportamiento mecánico de las mezclas. Algunos factores que se presentan son la temperatura de reacción del asfalto y el GCR, el tamaño y granulometría de los agregados, la adición de aditivos y utilización de diferentes técnicas para el reciclaje de pavimentos [6].

De acuerdo con la revisión de los estudios en el estado del arte, se demuestra que la incorporación de GCR en las mezclas asfálticas convencionales, ya sea por vía seca o por la vía húmeda aumenta ampliamente los comportamientos mecánicos de los pavimentos flexibles [6]

Una mezcla asfáltica modificada con GCR compactada con la prueba de tracción indirecta (RTI) señala que la mezcla asfáltica para el valor óptimo de asfalto calculado presenta baja susceptibilidad a los daños producidos por el agua, debido a que presenta un valor de RTI del 90%, cumpliendo con las especificaciones IDU-560-11, el cual el porcentaje mínimo esperado es del 75% según el numeral 560.4.3. 3.6. [11].

El grado de desempeño buscado en la estimación por la tecnología SHRP del Asfalto modificado con GCR, identifica un rango de temperatura de trabajo holgado del asfalto con un PG 94-34, por ende, una buena resistencia al ahuellamiento, a la fatiga producida por las cargas del tránsito y fisuración inducida por bajas temperaturas, esto es congruente con los resultados obtenidos en la caracterización mecánica [11].

Los valores de una mezcla asfáltica con GCR aumentan en comparación con una mezcla asfáltica convencional, aumentan en un 26% cuando se utiliza 1% de GCR, y 42% cuando se utiliza el 2% por vía seca, la molienda de llantas que se obtienen de llantas usadas fuera de uso se ha demostrado que mejora las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas adicionándolo por la vía seca o modificando el ligante por el proceso de la vía húmeda. De igual manera el uso de GCR mitiga la contaminación ambiental al utilizar el GCR proveniente de las llantas usadas, dándoles un aprovechamiento final amigable con el ambiente [17].

## 10. MARCO LEGAL

Para la realización de la presente investigación, se consideraron los siguientes marcos legales de referencia:

DECRETO 442 DEL 2015 – “Por el cual se crea el Programa de aprovechamiento y/o valorización de llantas usadas en el Distrito Capital y se adoptan otras disposiciones” (SECRETARIA DE AMBIENTE DE BOGOTA).

DECRETO 265 DEL 2016 - “Por medio del cual se modifica el Decreto Distrital 442 de 2015 y se adoptan otras disposiciones” (SECRETARIA DE AMBIENTE DE BOGOTA).

SECCIÓN 560-11 - Mezclas asfálticas en caliente con asfaltos modificados con caucho por vía húmeda (IDU).

RESOLUCIÓN. 6981 diciembre 27 de 2011 - "Por la cual se dictan lineamientos para el aprovechamiento de llantas y neumáticos usados, y llantas no conforme en el Distrito Capital" (IDU).

Artículo 413 – 13 “Suministro de cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado” (INVIAS).

Norma INV E – 824 – 13 “Diseño de mezclas de concreto asfáltico elaboradas con asfalto – caucho”.

Artículo 467 – 13 “Mezclas asfálticas en caliente con cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado” (INVIAS).

Norma INV E – 748 “Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall”

Norma INV E – 736 “porcentajes de vacíos en aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abierta.

Norma INV E – 725 “Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta”.

ASTMD4123-82(1995) “Método de prueba estándar para la prueba de tensión indirecta para el módulo resiliente de mezclas bituminosas”.

## 11. METODOLOGÍA

La metodología de la investigación se divide en cuatro grandes etapas: (I) Caracterización de los materiales para la fabricación de las mezclas asfálticas (asfaltos y agregados). (II) Realización de los diseños de mezcla (MDC-19 Control y MDC GCR) por medio de la metodología Marshall con el objetivo de determinar el contenido de asfalto. (III) Simulación de envejecimiento a corto y largo plazo. (IV) Evaluación del comportamiento mecánico de las mezclas (RTI y MR) en muestras envejecidas a corto y largo plazo.

**Etapas I:** Caracterización de los materiales para la fabricación de las mezclas asfálticas

### *Agregados pétreos*

Para la fabricación de las mezclas fueron utilizados agregados convencionales, provenientes de la empresa Concescol de la ciudad de Bogotá. Sobre los agregados se realizaron ensayos de caracterización física siguiendo los lineamientos (INVIAS 2013), con el fin de evaluar la resistencia mecánica (desgaste en la máquina de los Ángeles), durabilidad del material (solidez ante el sulfato de sodio), forma de las partículas (índices de aplanamiento, alargamiento y caras fracturadas), limpieza del agregado (azul de metileno, equivalente de arena y materia orgánica) y las relaciones masa-volumen en las diferentes fracciones. Para la fabricación de las mezclas, se modificó la granulometría original de los agregados, tomando como referencia los valores promedio en porcentajes de la franja granulométrica que exige la especificación (INVIAS 2013) (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Los resultados de la caracterización física se presentan en la Tabla 1, con los cuales se puede evidenciar que cumple las especificaciones para la fabricación de mezclas asfálticas.

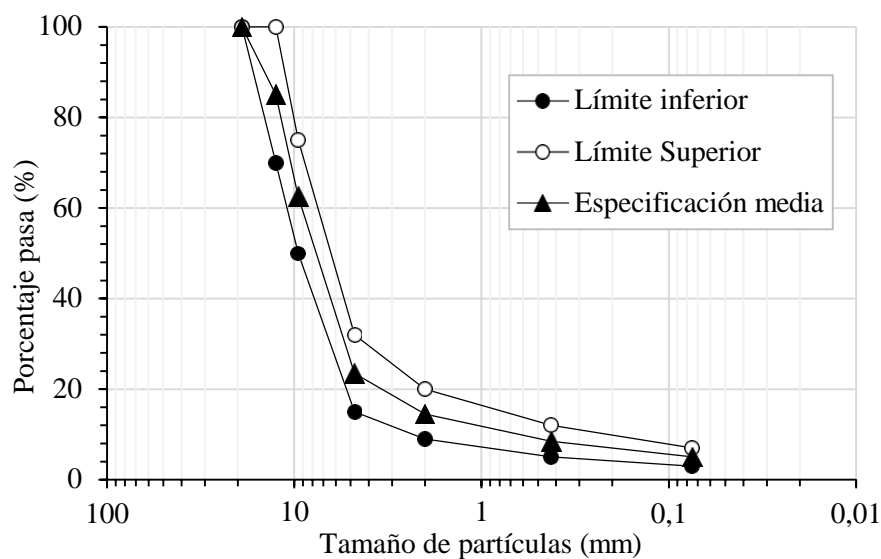


Figura 3 Granulometría de agregados pétreos para la fabricación de mezclas asfálticas densas.

Tabla 1. Caracterización del agregado

Ensayo	Especificación	Unidad	Especificación	Resultado
Índice de aplanamiento	NLT 354	%	---	19
Índice de alargamiento	NLT 354	%	---	14
Porcentaje de caras fracturadas	ASTM D-5821	%	100	85.2
Gravedad específica de agregado grueso	AASHTO T85	---	---	2.55
Absorción agregado grueso	AASHTO T85	%	---	3.1
Gravedad específica de agregado fino	AASHTO T84	---	---	2.79
Absorción agregado fino	AASHTO T84	%	---	2.9
Equivalente de arena	ASTM D-854	%	min 50	63
Desgaste de máquina de los ángeles	AASHTO T96	%	máx. 25	19.5
Solidez	AASHTO T228	%	máx. 18	13.3
Contenido de materia orgánica	ASTM C-40	---	máx. 3	<1
Valor azul de metileno	UNE 933-9	mg/g	máx. 10	1,25



### ***Asfalto modificado con GCR***

El asfalto modificado con GCR es producido y comercializado por la empresa Incoasfaltos. Las características físicas del asfalto modificado con GCR utilizado se presentan en la Tabla 2., las cuales cumplen con los requisitos de calidad exigidos para la fabricación de las MDC según la especificación del (INVIAS, 2013).

*Tabla 2. Caracterización del asfalto modificado con GCR.*

<b>Ensayo</b>	<b>Especificación</b>	<b>Unidad</b>	<b>Especificación min. – máx.</b>	<b>Resultado</b>
Penetración 25°C	ASTM-D5	mm	25 – 75	45
Penetración 4°C	ASTM-D5	mm	15	16
Punto de ablandamiento	ASTM-D36	°C	54	64
Viscosidad aparente 175°C	ASTM D-316	Pa. s	1.5 – 5.0	3.0
Resiliencia 25°C	ASTM D-5329	%	20	48
Punto de ignición	ASTM D 3143	°C	230	260
Penetración del residuo luego de la pérdida por calentamiento	ASTM D 2872	%	75	77

### ***Cemento Asfáltico 60-70***

Las características físicas del cemento asfáltico (AC 60-70) utilizado se presentan en la Tabla 4 y cumplen con los requisitos de calidad exigidos para la fabricación de mezclas MDC-19 según INVIAS (2013).

*Tabla 3. Propiedades generales asfalto AC 60-70.*

<b>Prueba</b>	<b>Método</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valores recomendados</b>	<b>Resultados</b>
Tests on the original asphalt				
Gravedad específica	AASHTO T228-04	-	-	1.012
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D5/D5M-13	0.1 mm	60-70	62.5
Índice Penetración	NLT 181-88	-	-1.2/+0.6	-0.94
Viscosidad (60°C)	ASTM D4402-15	Poises	1500 mínimo	1770
Punto de ablandamiento	ASTM D36-06	°C	48-54	49
Ductilidad (25°C, 5cm/min)	ASTM D113-99	cm	100 mínimo	>105
Punto de Fuego	ASTM D92-01	°C	230 mínimo	289
Pruebas en el residuo después de RTFOT (Prueba de horno de película delgada rodante)				
Pérdida de masa	ASTM D2872-12e1	%	0.8 máximo	0.63
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D5/D5M-13	%	50 mínimo	77

Etapa II: Realización de los diseños de mezcla (MDC-19 Control y MDC GCR) por medio de la metodología Marshall con el objetivo de determinar el contenido de asfalto.

El procedimiento del método Marshall consistió en la elaboración de briquetas cilíndricas con una dimensión de aproximadamente 101.6 mm de diámetro y 63.5 mm de altura, siguiendo el procedimiento de la norma INV-748-07, Los materiales utilizados deben cumplir con las especificaciones granulométricas y se deberá determinar la gravedad específica bulk, la gravedad específica del asfalto y se debe analizar la densidad de vacíos de las briquetas.

Las briquetas se utilizaron para determinar la estabilidad y el flujo, realizar el análisis de densidad y de vacíos, los cuales nos sirven para determinar el diseño de la mezcla, los resultados de estabilidad y flujo se obtienen a partir del promedio de los valores obtenidos y los contenidos de asfalto que se utilizaron para las mezclas MDC 19 son de 4.5 %, 5.0 %, 5.5 % y 6.0 % y para la MDC- GCR son de 6.0 %, 6.5 % 7.0 % y 7.5 %. Se escogieron contenidos de asfaltos mayores para el diseño de la mezcla MDC-GCR dada la elevada viscosidad del asfalto modificado con GCR.

uno de los factores que se tiene en cuenta son los parámetros volumétricos de la mezcla, como lo son los vacíos llenos de aire (VA), vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos llenos con asfalto (VFA) y el contenido de asfalto efectivo (Pbe), estos parámetros indican un posible comportamiento de la mezcla.

La selección final del porcentaje óptimo de la mezcla es usualmente la más económica y la que cumple con todas las especificaciones que se muestran en la tabla 4 para MDC-19 y en la tabla 5 para la MDC-GCR.

*Tabla 4 Características para determinar porcentaje óptimo de la mezcla asfáltica MDC-19*

Características		Especificación INV-E	Requisito
Compactación Golpes-Cara		E-748	75
Estabilidad mínima (Newton)		E-748	9000 N
Flujo(milímetros)		E-748	2-3.5
Estabilidad y Flujo (KN/mm)		E-748	3-6
Vacíos CON AIRE (Va) [%]	Rodadura	E-736,799	4-6
	Intermedia		4-7
	Base		5 - 8
Vacíos en los agregados (VAM) [%]	Tamaño máximo 19 mm	E-799	≥15
Vacíos llenos de asfalto (VFA) [%]		E-799	65-75

*Fuente: Elaboración propia.*

*Tabla 5 Características para determinar porcentaje óptimo de la mezcla asfáltica MDC-19 modificada con GCR*

Características	Norma de ensayo	Requisito
Compactación (Golpes-Cara)	E-824	75
Contenido de asfalto caucho (%)	E-824	6.0-9.0
Estabilidad mínima en newton	E-824	8250 N
Flujo en milímetros	E-824	2.5 - 5.5
Estabilidad y Flujo (KN-mm)	E-824	3 - 6
Vacíos con aire (Va) [%]	E-799	3 - 5
Vacíos en los agregados (VAM) [%]	E-799	≥15
Vacíos llenos de asfalto (VFA) [%]	E-799	Reportar
Relación Filler/ligante (p/p)	E-799	reportar
Espesor promedio mínimo de película de asfalto (μm)	E-741	7.5

*Fuente: Elaboración propia.*

Etapas III: Simulación de envejecimiento a corto y largo plazo.

Se realizó el envejecimiento a corto plazo en donde la mezcla experimenta la volatilización y la oxidación muy rápidamente en un horno a temperatura de 150 °C por un tiempo de dos horas, mientras que para el envejecimiento a largo plazo el proceso es más lento en un horno a una temperatura de 85°C durante 5 días, tanto para mezcla MDC- 19 y la mezcla MDC-GCR. Conforme se evidencia en la Figura 4.



*Figura 4. briquetas envejecidas al horno a 85°C.*

Etapa IV: evaluación del comportamiento mecánico de las mezclas (RTI y MR) en muestras envejecidas a corto y largo plazo.

#### Ensayo MR

Luego de envejecidas las mezclas se determinó los módulos resilientes en la maquina UTM – 30 bajo la norma ASTM D4123-82(1995) conforme se presenta en la figura 5, para las mezclas MDC-19 Y MDC- GCR envejecidas y no envejecidas realizando la comparación de los módulos resilientes obtenidos por la aplicación de cargas cíclicas a diferentes frecuencias de; 10 Hz, 5.0 Hz y 2.5 Hz. Para tal fin, se aplicaron cinco ciclos con una carga diametral de 1200 N, la temperatura de laboratorio (aproximadamente 20 °C).

El módulo resiliente se designa como Mr y se calcula con la siguiente expresión:

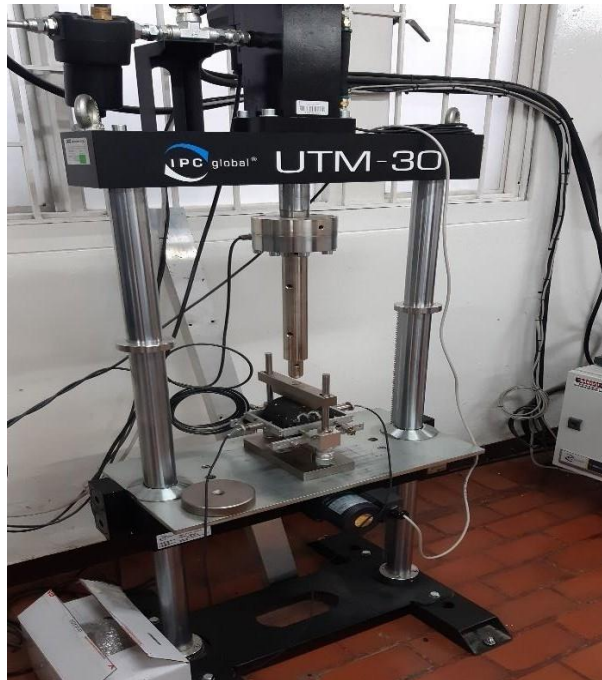
$$Mr = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

Donde:

**Mr:** Modulo resiliente

$\sigma_d$ : Esfuerzo Desviador

$\epsilon_r$ : deformación axial recuperable



*Figura 5- Ensayo de módulo resiliente a las briquetas con mezcla asfáltica convencional MDC-19 y mezcla asfáltica modificada con GCR no envejecidas y envejecidas.*

#### Ensayo de RTI

El ensayo consiste en someter a compresión diametral las briquetas elaboradas con los contenidos óptimos de asfalto como para una mezcla MDC-19 Y MDC- GCR, es decir con 5.3% y 70. % de asfalto respectivamente. Sobre las mezclas, se realizó el envejecimiento a corto y largo plazo. Posteriormente, las muestras fueron sumergidas en agua durante dos horas a una temperatura de 25°C con el fin de ser ensayadas y determinar la carga máxima que soportan antes de la falla. El ensayo se realizó en una prensa Marshall por deformación controlada. La velocidad de aplicación del ensayo corresponde a 48 mm/minuto, conforme se presenta en la Figura 6.



*Figura 6. Ensayo de tracción indirecta (RTI) después sumergidas en el baño maría a 25°C.*

Para el cálculo de la RTI se utilizó la siguiente expresión:

$$\begin{array}{r}
 \square \square \square \\
 = \frac{\square \square \square \square * \square}{\square * \square * \square}
 \end{array}$$

Donde:

RTI: Resistencia a la tensión indirecta. (Kpa).

P: Carga máxima de ruptura. (N).

D: Diámetro de la briqueta Marshall. (mm).

H: Altura de la briqueta Marshall. (mm).

## 12. RESULTADOS

### 12.1 Método Marshall

Resultados obtenidos del ensayo Marshall, a continuación, se presentan las curvas Marshall para la determinación de los porcentajes óptimos de asfalto, tanto para la mezcla de control MDC 19 Y la mezcla MDC GCR.

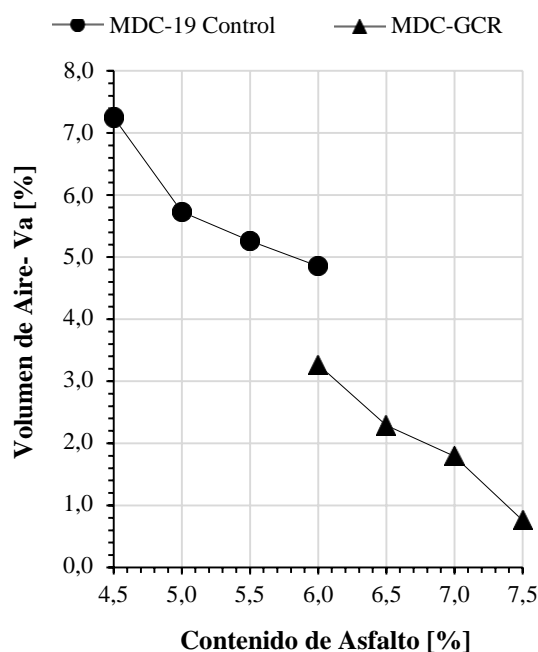


Figura 8. Evolución de vacíos de aire.

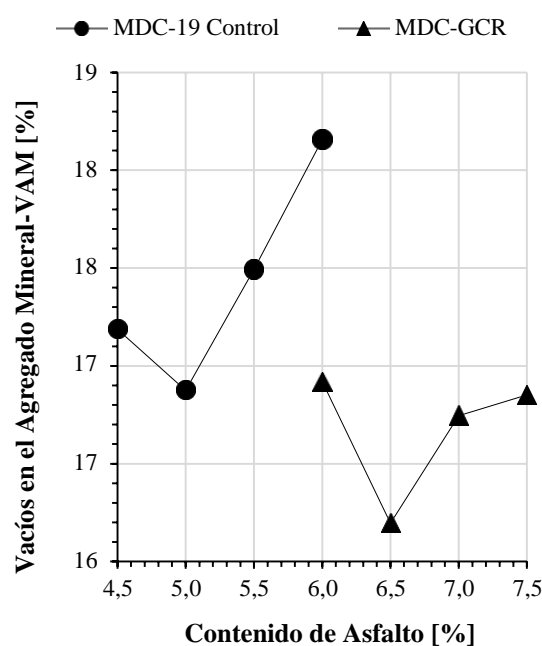


Figura 7. Vacíos en el agregado mineral con respecto al contenido de asfalto.

De acuerdo como se observa en la Figura 7 el volumen de aire se para una mezcla MDC-19 de control para un rango de vacío entre 4% y 6%, cumple para los contenidos de asfaltos 5%, 5.5% y 6% y para la MDC- GCR se observa en la Figura 8 para rango de vacíos entre el 3% y 5% cumple para los contenidos de asfalto del 6%.

La figura 7 muestra que a mayor contenido de asfalto menor es el porcentaje de vacíos de la mezcla por ende el volumen de la mezcla se va reduciendo a medida que los vacíos se van rellenando de asfalto.



La figura 8 de los vacíos en el agregado mineral muestra que tanto para una mezcla asfáltica convencional MDC-19 como para una mezcla asfáltica MDC-GCR se cumple con los parámetros especificados por la norma ( $\geq 15\%$ ).

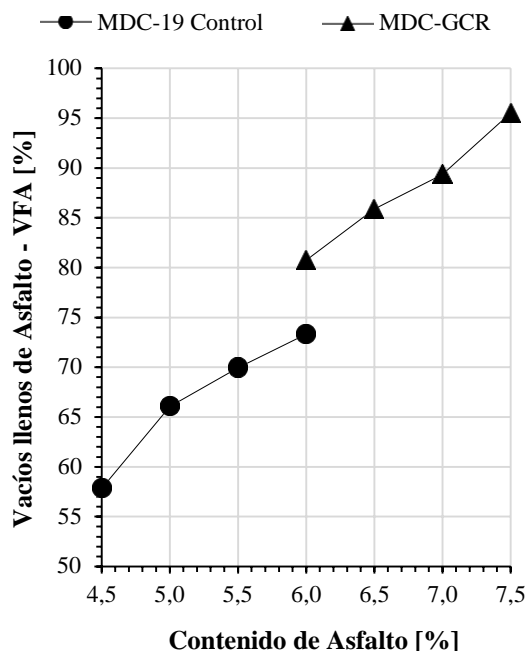


Figura 9. Vacíos llenos de asfalto con respecto al contenido de asfalto.

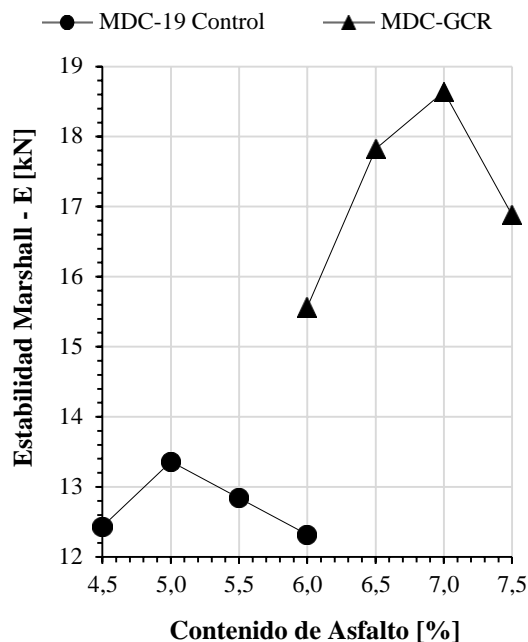


Figura 10. Estabilidad Marshall con respecto al contenido de asfalto.

Los vacíos llenos de asfalto para la mezcla MDC-19 de control según la especificación INVIAS se debe encontrar en un rango entre 65 % y 75 %, como se observa en la Figura 9 los contenidos de asfaltos 5.0 %, 5.5 % y 6 % cumplen con las especificaciones, con respecto a los vacíos llenos de asfalto Para la MDC- GCR según la especificación INVIAS E IDU se debe encontrar entre un rango entre 80.7 % y 95.5 % esta especificación se cumple como se observa en la Figura 10 para los contenidos de asfaltos de 6.0 %, 6.5 %, 7 % y 7.5 %.

En la figura 9 se observa que a mayor contenido de asfalto mayor es el porcentaje de vacíos llenos de asfalto debido a que las partículas de los agregados se van recubriendo de asfalto y se van liberando los vacíos en la mezcla haciéndola mucho más densa.

En la figura 10 se observa que para la mezcla asfáltica MDC-19 de control, la estabilidad decrece a partir del 5% del contenido de asfalto satisfaciendo los requerimientos de la norma donde la estabilidad debe ser mayor de 9000 N, es decir que todas cumplen según las especificaciones

INVIAS, igualmente para la mezcla asfáltica MDC-GCR, la estabilidad decrece a partir del 7% del contenido de asfalto satisfaciendo los requerimientos de la norma donde la estabilidad debe ser mayor de 8250 N.

La estabilidad de la mezcla asfáltica con GCR presenta valores mayores de estabilidad, esto quiere decir que presentan un mejor comportamiento a los desplazamientos y a las deformaciones inducidas por el tráfico.

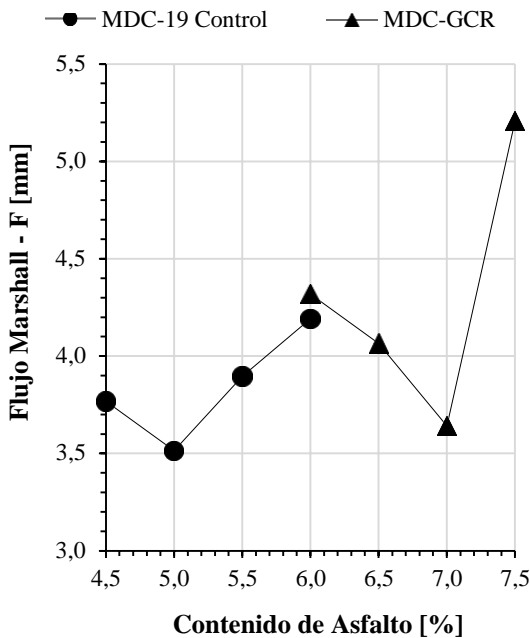


Figura 11. Flujo Marshall con respecto al contenido de asfalto.

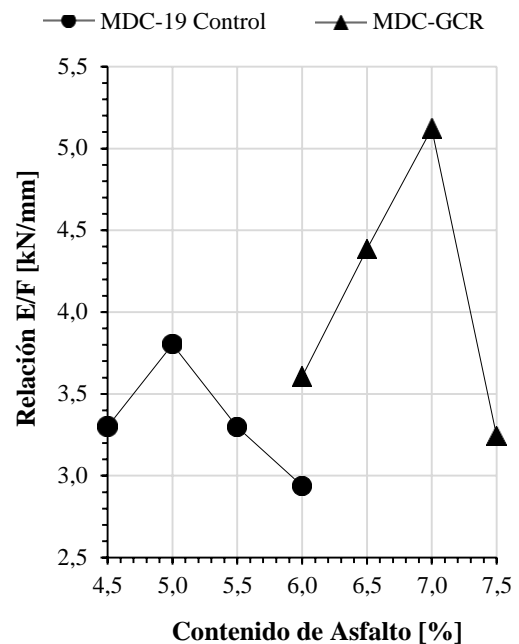


Figura 12. Relación E/F con respecto al contenido de asfalto.

La figura 11 del flujo Marshall muestra que para la mezcla asfáltica MDC-19 de control, el contenido de asfalto que cumple con la especificación INVIAS es del 5 % ya que presenta un flujo de 3.5 mm, se observa que a mayor contenido de asfalto mayor es el flujo aumento considerablemente las deformaciones en la mezcla, para la mezcla asfáltica MDC-GCR como se observa en la Figura 11 los contenidos de asfalto de 6.0 %, 6.5 % 7.0 % y 7.5% presentan un flujo variable de 3.6 mm a 5.2 mm cumpliendo con las especificaciones de la norma, de igual manera se evidencia el contenido óptimo para la mezcla es del 7.0 % ya que si le adicionamos más contenido de asfalto el flujo se aumenta por ende la deformación en la mezcla .

La Figura 12 de la relación flujo/ estabilidad muestra que para la mezcla asfáltica MDC-19 de control, los contenidos de asfalto de 4.5%, 5% y 5.5% están en el rango entre 3 kN/mm y 6 kN/mm de estabilidad/flujo de acuerdo con lo que establece la norma y que el contenido óptimo de asfalto es del 5 % ya que a partir de este la curva empieza a decrecer disminuyendo esta relación, de igual manera para la mezcla MDC-GCR la relación estabilidad/ flujo presenta un contenido óptimo de asfalto del 7.0%, ya que a partir de este entre mayor sea el contenido de asfalto la relación estabilidad/flujo va disminuyendo.

*Tabla 6 Resumen resultados Ensayo Marshall.*

RESULTADOS ENSAYOS MARSHALL (INV E-748-07) MEZCLA ASFALTICA COVENCIONAL MDC -19 Y MEZCLA MODIFICADA CON GCR							
Mezcla	Asfalto [%]	Va [%]	VAM [%]	VFA [%]	E [kN]	F [mm]	E/F [kN/mm]
MDC-19 Control	4.5	7.2	17.2	57.8	12.4	3.8	3.3
	5.0	5.7	16.9	66.1	13.4	3.5	3.8
	5.5	5.3	17.5	69.9	12.8	3.9	3.3
	6.0	4.9	18.2	73.3	12.3	4.2	2.9
MDC-GCR	6.0	3.3	16.9	80.7	15.6	4.3	3.6
	6.5	2.3	16.2	85.9	17.8	4.1	4.4
	7.0	1.8	16.7	89.3	18.6	3.6	5.1
	7.5	0.8	16.9	95.5	16.9	5.2	3.2

*Fuente: Elaboración propia.*

Obtenido los porcentajes óptimos de asfaltos del 5.3% para una mezcla asfáltica convencional y 7.0% para una mezcla asfáltica modificada con GCR, se hicieron 12 briquetas de las cuales 6 se elaboraron para un MDC-19 Y 6 para una MDC- GCR, para posteriormente modelar el envejecimiento a corto plazo una temperatura a 150° durante dos horas y realizar el envejecimiento a largo plazo en el horno por 5 días a una temperatura de 85°C.

## 12.2 Módulo resiliente

Determinación de Módulo Resiliente (MR) de una mezcla asfáltica convencional y una mezcla asfáltica modificada con grano de caucho reciclado (GCR) no envejecidas y con envejecimiento,

utilizando el ensayo de tensión indirecta con cargas repetidas por medio de la maquina UTM-30 la cual se regula mediante la norma ASTM D4123 -82 (1995), finalmente en la tabla 7 se evidencia un resumen de los datos obtenidos del ensayo.

Mezcla Asfáltica	Frecuencia de Ensayo [Hz]								
	10			5			2.5		
	Prome dio [MPa]	Desviac ión Estándar	Coeficie nte de Variaci ón [%]	Prome dio [MPa]	Desviac ión Estándar	Coeficie nte de Variaci ón [%]	Prome dio [MPa]	Desviac ión Estándar	Coeficie nte de Variaci ón [%]
MDC-19 SE	6360	109	2	5634	300	5	4785	287	6
MDC-19 CE	8503	876	10	7260	539	7	5968	451	8
MDC- GCR SE	5060	849	17	4274	604	14	3721	543	15
MDC- GCR CE	6312	691	11	5473	586	11	4823	498	10

Tabla 7 Resultados obtenidos del módulo resiliente (MR).

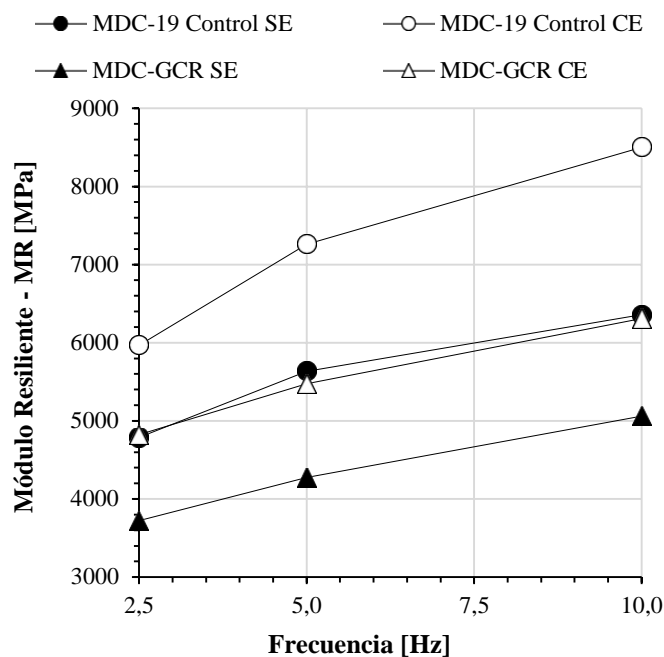


Figura 13. Resultados obtenidos del módulo resiliente (MR).

Conforme se observa en la Figura 13. Para una carga de aplicación de 1200 N con una frecuencia de 10Hz la mezcla asfáltica convencional sin envejecer presenta un módulo de resiliente (MR) de 6360 MPA y la mezcla asfáltica convencional envejecida presenta módulo de 8503 MPA, lo cual quiere decir que con el envejecimiento se obtiene un aumento del 33.7% en la rigidez de la mezcla.

Para una carga de aplicación de 1200 N con una frecuencia de 5Hz la mezcla asfáltica convencional sin envejecer presenta un módulo de resiliente (MR) de 5634 MPA y la mezcla asfáltica convencional envejecida presenta módulo de 7260 MPA, lo cual quiere decir que con el envejecimiento se obtiene un aumento del 28.86% en la rigidez de la mezcla.

Para una carga de aplicación de 1200 N con una frecuencia de 2.5Hz la mezcla asfáltica convencional sin envejecer presenta un módulo de resiliente (MR) de 4785Mpa y la mezcla asfáltica convencional envejecida presenta módulo de 5968 MPA, lo cual quiere decir que con el envejecimiento se obtiene un aumento del 24.7% en la rigidez de la mezcla, se evidencia que a medida en que disminuye la frecuencia con la que se aplica la carga se disminuye el módulo resiliente de las mezclas.

Para una carga de aplicación de 1200 N con una frecuencia de 10Hz la mezcla asfáltica modificada con GCR sin envejecer presenta un módulo resiliente (MR) de 5060 MPA y la mezcla asfáltica modificada con GCR envejecida presenta módulo de 6312 MPA, lo cual quiere decir que con el envejecimiento se obtiene un aumento del 24.74% en la rigidez de la mezcla.

Para una carga de aplicación de 1200 N con una frecuencia de 5Hz la mezcla asfáltica modificada con GCR sin envejecer presenta un módulo resiliente (MR) de 4274 MPA y la mezcla asfáltica modificada con GCR envejecida presenta módulo de 5473 MPA, lo cual quiere decir que con el envejecimiento se obtiene un aumento del 28.05% en la rigidez de la mezcla.

Para una carga de aplicación de 1200 N con una frecuencia de 2.5Hz la mezcla asfáltica modificada con GCR sin envejecer presenta un módulo resiliente (MR) de 3721 MPA y la mezcla asfáltica modificada con GCR envejecida presenta módulo de 4823 MPA, lo cual quiere decir que con el envejecimiento se obtiene un aumento del 29.61% en la rigidez de la mezcla, se evidencia que a medida que disminuye la frecuencia con la que se aplica la carga se reduce el módulo resiliente de las mezclas.

Para una carga de aplicación de 1200 N con una frecuencia de 10Hz la mezcla asfáltica MDC-19 sin envejecer presenta un módulo resiliente (MR) de 6360 MPA y la mezcla asfáltica modificada con GCR sin envejecer presenta módulo de 5060 MPA, lo cual quiere decir que la mezcla asfáltica convencional MDC-16 es un 25.7% más rígida respecto a la mezcla asfáltica modificada con GCR sin envejecer.

Para una carga de aplicación de 1200 N con una frecuencia de 5Hz la mezcla asfáltica MDC-19 sin envejecer presenta un módulo resiliente (MR) de 5634 MPA y la mezcla asfáltica modificada con GCR sin envejecer presenta módulo de 4274 MPA, lo cual quiere decir que la mezcla asfáltica convencional MDC-16 es un 31.82% más rígida respecto a la mezcla asfáltica modificada con GCR sin envejecer.

Para una carga de aplicación de 1200 N con una frecuencia de 2.5Hz la mezcla asfáltica MDC-19 sin envejecer presenta un módulo resiliente (MR) de 4785 MPA y la mezcla asfáltica modificada con GCR sin envejecer presenta módulo de 3721 MPA, lo cual quiere decir que la mezcla asfáltica convencional MDC-16 es un 28.6% más rígida respecto a la mezcla asfáltica modificada con GCR sin envejecer, se evidencia que a medida en que disminuye la frecuencia con la que se aplica la carga se reduce el módulo resiliente de las mezclas.

Para una carga de aplicación de 1200 N con una frecuencia de 10Hz la mezcla asfáltica MDC-19 envejecida presenta un módulo resiliente (MR) de 8503 MPA y la mezcla asfáltica modificada con GCR envejecida presenta módulo de 6312Mpa, lo cual quiere decir que la mezcla asfáltica convencional MDC-19 es un 34.7% más rígida respecto a la mezcla asfáltica modificada con GCR envejecida.

Para una carga de aplicación de 1200 N con una frecuencia de 5Hz la mezcla asfáltica MDC-19 envejecida presenta un módulo resiliente (MR) de 7260Mpa y la mezcla asfáltica modificada con GCR envejecida presenta módulo de 5473 MPA, lo cual quiere decir que la mezcla asfáltica convencional MDC-16 es un 32.65% más rígida respecto a la mezcla asfáltica modificada con GCR envejecida.

Para una carga de aplicación de 1200 N con una frecuencia de 2.5Hz la mezcla asfáltica MDC-19 envejecida presenta un módulo resiliente (MR) de 5968 MPA y la mezcla asfáltica modificada con GCR envejecida presenta módulo de 4823 MPA, lo cual quiere decir que la mezcla asfáltica

convencional MDC-16 es un 23.74% más rígida respecto a la mezcla asfáltica modificada con GCR envejecida, se evidencia que a medida en que disminuye la frecuencia con la que se aplica la carga se reduce el módulo resiliente de las mezclas.

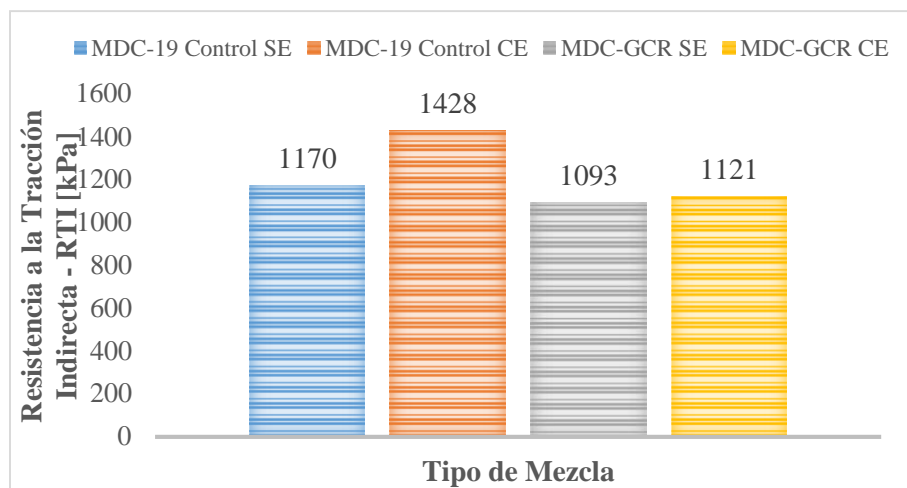
### 12.3 Ensayo de Resistencia a la Tracción Indirecta RTI.

Se realizó el ensayo a tracción indirecta (RTI) según la especificación INV-E-725-3, para obtener la carga máxima que aguanta una mezcla antes de romperse, a continuación, se relaciona los resultados obtenidos del ensayo.

*Tabla 8 datos generales del ensayo de la resistencia a la tracción indirecta (RTI).*

Tipo de Mezcla	RTI	Desviación Estándar	Coeficiente de Variación [%]	Va [%]
MDC-19 Control SE	1170	27	2.3	6.2
MDC-19 Control CE	1428	124	8.7	6.2
MDC-GCR SE	1093	69	6.4	5.1
MDC-GCR CE	1121	85	7.6	5

*Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 14. Resultados obtenidos del ensayo de la resistencia a la tracción indirecta (RTI).*

En la tabla 8 se presenta los resultados del ensayo a la tracción indirecta con las respectivas estadísticas como lo son la desviación estándar y el coeficiente de variación, así como los volúmenes de aire de la mezcla, de igual manera en la figura 14 se puede visualizar el resultado del ensayo a tracción indirecta de las muestras sin envejecimiento y con envejecimiento.

Como se evidencia en la figura 14 la resistencia antes de la rotura para la mezcla asfáltica convencional MDC-19 sin envejecer equivale a 1170 kPa y para la misma mezcla envejecida esta resistencia equivale a 1428 kPa, es decir, que en el proceso de envejecimiento esta mezcla obtuvo un aumento en la resistencia del 22.06%

Como se evidencia en la figura 14 la resistencia antes de la rotura para la mezcla asfáltica modificada con GCR sin envejecer equivale a 1093 kPa y para la misma mezcla envejecida esta resistencia equivale a 1121 kPa, es decir, que en el proceso de envejecimiento de esta mezcla obtuvo un aumento en la resistencia del 2.56%, lo cual indica que este tipo de mezcla con el tiempo conserva su resistencia haciendo que el pavimento sea más estable en el tiempo.

De acuerdo a la figura 14 se puede identificar que la mezcla asfáltica convencional MDC-19 sin envejecer presenta una resistencia a la tracción indirecta antes de la rotura de 1170 kPa y la mezcla asfáltica modificada con GCR sin envejecer presenta una resistencia a la tracción indirecta antes de la rotura de 1093, esto quiere decir que el asfalto convencional MDC-19 es 7.04% más resistente que el asfalto modificado con GCR.

De acuerdo a la figura 14 se puede identificar que la mezcla asfáltica convencional MDC-19 envejecido presenta una resistencia a la tracción indirecta antes de la rotura de 1428 kPa y la mezcla asfáltica modificada con GCR envejecida presenta una resistencia a la tracción indirecta antes de la rotura de 1121 kPa, esto quiere decir que el asfalto convencional MDC-19 envejecido es 30.7% más resistente que el asfalto modificado con GCR envejecido.



### 13. CONCLUSIONES

A partir de la realización del diseño de dos mezclas asfálticas densas con asfalto modificado con grano de caucho reciclado y asfalto 60-70 respectivamente, y después de evaluar el comportamiento mecánico por medio de los ensayos de módulo resiliente y resistencia a la tracción indirecta en condiciones de envejecimiento a corto y largo plazo, es posible concluir que:

1. La mezcla asfáltica convencional con envejecimiento presenta valores muy altos de módulo resiliente, haciendo que la mezcla sea más rígida con el tiempo y más susceptible a las fisuras por fatiga.
2. La mezcla asfáltica modifica con GCR presenta una disminución en la rigidez de la mezcla presentando valores de módulo resiliente más bajo con respecto al asfalto convencional esto debido a que requiere mayores contenidos de asfalto presentándose una reducción en la resistencia de la mezcla, y haciendo la mezcla mucho más frágil.
3. La mezcla modificada con GCR presenta un mejor comportamiento al envejecimiento debido a que el módulo resiliente aumenta en un 3.0 % después de envejecida la mezcla, variando muy poco la rigidez de la mezcla en el tiempo, presentando una muy poca variación de sus propiedades y sus características, aumentando así su vida útil.
4. La mezcla asfáltica convencional sin envejecimiento presenta valores similares de módulo resiliente con respecto a una mezcla modificada con GCR con envejecimiento, esto quiere decir que el asfalto modificado con GCR conserva sus propiedades en el tiempo, haciendo la mezcla mucho más durable.
5. De acuerdo con el ensayo Marshall se determina que la mezcla modificada con GCR necesita un mayor contenido de asfalto, que la mezcla convencional por ende la mezcla modificada con GCR presenta una reducción en la fricción interna de la mezcla, generando una reducción en la resistencia general de la mezcla.
6. La mezcla modificada con GCR presenta mejores valores de flujo haciendo que la mezcla sea menos susceptible a los cambios por temperatura, esto debido a las propiedades elásticas del caucho.
7. La mezcla modificada con GCR presenta una buena estabilidad, haciendo que el pavimento soporte los desplazamientos y las deformaciones que produce el tránsito, mejorando la capacidad de respuesta al ahuellamiento.

8. La mezcla asfáltica modificada con GCR es una buena solución a los problemas que presentan los pavimentos, debido a que presenta mejores valores de estabilidad/flujo, haciendo que la mezcla sea más resistente a las cargas elevadas del tránsito y a las inclemencias del clima, aumentando así su vida útil.

## 14. ANEXOS



*Tabla 9 Diseño Marshall para los porcentajes de asfalto convencional (MDC-19)- 4.5%, 5.0% Y 5.5.*

ENSAYO MARSHALL (INV. E-748-13) - CONCRETO ASFÁLTICO										
PROYECTO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL ENVEJECIMIENTO A LARGO PLAZO DE UNA MEZCLA CON ASFALTO MODIFICADO CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO.									
TEMPERATURA DE MEZCLA	150°C									
TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN	135° - 140°C									
No. DE GOLPES POR CAPA	75 GOLPES									
PROCEDENCIA AGREGADOS PETREOS	CONCRESCOL						Gs. A. PETREOS	2,64 - 2,52		
TIPO DE CEMENTO ASFALTICO	60-70						Gs. ASFALTO	1.012		
	DISEÑO CONVENCIONAL									
Briqueta No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Tipo de Mezcla	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	
% Asfalto	4.5%	4.5%	4.5%	5.0%	5.0%	5.0%	5.5%	5.5%	5.5%	
Altura Briqueta (cm)	6.41	6.44	6.42	6.35	6.4	6.39	6.38	6.36	6.35	
Peso briqueta en aire Seca (g)	1187	1189	1194	1187	1186	1191	1193	1191	1197	
Peso briqueta en aire SSS (g)	1189	1191	1196	1189	1190	1193	1194	1192	1198	
Peso briqueta en agua (g)	660	658	661	664	665	663	665	663	665	
Lectura de carga (KN)	12.87	12.56	12.56	13.60	13.88	12.90	12.90	12.67	13.07	
Flujo (1/100") Milsimas pulgadas	145	150	150	140	140	135	155	155	150	
LA LECTURA DE CARGA SE DEBE MULTIPLICAR POR LA CONSTANTE DE CALIBRACION DEL ANILLO (45,1) PARA EXPRESAR LA E										
OBSERVACIONES	1 A 3 = 4.5% 4 A 6 = 5% 7 A 9 = 5.5% 10 A 12 = 6%									
Lab/ta: <u>Fay. Saeed S.</u>	Reviso: <u>PINZ HAB</u> LABORATORIO									

*Fuente: Elaboración propia*



Tabla 11 Diseño Marshall para los porcentajes de asfalto- caucho 6.0%, 6.5% y 7.0%.

ENSAYO MARSHALL (INV. E-748-13) - CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO CON GCR									
PROYECTO	ESTUDIO COMPARATIVO DEL ENVEJECIMIENTO A LARGO PLAZO DE UNA MEZCLA CON ASFALTO MODIFICADO CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO.								
TEMPERTURA DE MEZCLA	160°C								
TEMPERTURA DE COMPACT	150-155°C								
No. DEGOLPES POR CAPA	75 GOLPES								
PROCEDENCIA AGREGADOS	CONCRESCOL						Gs.A.PETREOS	2,64-2,52	
TIPO DE CEMENTO ASFALTI	ASFALTO CAUCHO						Gs. ASFALTO	1	
DISEÑO ASFALTO - CAUCHO									
Briqueta No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tipo de Mezcla	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19
% Asfalto	6.0%	6.0%	6.0%	6.5%	6.5%	6.5%	7.0%	7.0%	7.0%
Altura Briqueta (cm)	6.52	6.42	6.41	6.46	6.45	6.45	6.35	6.39	6.34
Peso briqueta en aire Seca (g)	1195	1192	1188	1197	1202	1194	1196	1195	1193
Peso briqueta en aire SSS (g)	1196	1193	1189	1198	1203	1194	1198	1196	1194
Peso briqueta en agua (g)	673	678	674	679	683	678	682	677	676
Lectura de carga (KN)	15.74	16.03	16.1	18.39	17.68	18.81	18.96	19.06	18.09
Flujo (1/100") Miliesimas pulgada	150	170	170	155	160	160	140	150	140
E CARGA SE DEBE MULTIPLICAR POR LA CONSTANTE DE CALIBRACION DEL ANILLO (45,1) PARA EXPRESAR LA EST									
OBSERVACIONES	1 A 3 = 6% 4 A 6 = 6,5%								
	7 A 9 = 7% 10 A 12 = 7,5%								
Lab/ta: 									
Reviso: 									

Fuente: Elaboración propia



Registro fotográfico:



*Foto 1. Briquetas para el ensayo Marshall.*



*Foto 2. Pesaje de las briquetas.*



*Foto 3. Briquetas para el ensayo Marshall con asfalto-caucho, se determinó un óptimo de 7%.*



*Foto 4. Briquetas de asfalto convencional con el porcentaje óptimo de 5.3 %.*





*Foto 5. Briquetas con los porcentajes óptimos del 5.3 % y 7.0 %.*



*Foto 6. Temperatura de 85° para el envejecimiento.*



*Foto 7. Temperatura de 85° para el envejecimiento.*



*Foto 8. Ensayo a tracción indirecta (RTI)*



## 15. BIBLIOGRAFÍAS

- [1] D. 4. D. 2. D.C Secretaria Distrital de Ambiente, «Alcaldía de Bogotá,» 09 noviembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=63644>.
- [2] C. Correa, Artist, *“Implementación de mezcla asfáltica modificada con granulo de caucho en el barrio san Carlos de la localidad de Tunjuelito”*. [Art]. tesis de postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, 2018.
- [3] C. Martinez, Artist, *Analisis de ciclo de vida de los pavimentos asfálticos*. [Art]. Tesis de postgrado, Facultad de ingeniería civil, Universidad Militar Nueva Granada, 2015.
- [4] M. Toledo, «Slideshare.net, » 4 marzo 2014. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/ceciliahuapaya1/ejemplo-de-proyecto-de-investigacin-32316099>.
- [5] J. Forero, Artist, *Evaluación comparativa de mezclas convencionales y mezclas modificadas con granulo de caucho (GCR), por medio de briquetas desarrolladas en los laboratorios de la Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial (UAERMV)*. [Art]. Tesis de postgrado, Facultad Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, 2018.
- [6] L. C. C.M Díaz, Artist, *Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en*. [Art]. tesis de pregrado, faculta de ingeniería civil, Universidad santo tomas, 2017.
- [7] J. Maldonado, Artist, *"Estado del conocimiento de las mezclas asfálticas modificadas con grano caucho reciclado (GCR) en Colombia"*. [Art]. Tesis de Pregrado, Facultad de ingeniería Universidad militar Nueva Granda, Bogotá, Colombia, 2018.
- [8] F. R. M. C. & M.-E. M. J. Moreno, Artist, *Analysis of digestion time and the crumb rubber percentage in dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes. Construcción and Bulldog Material* 25 2323–2334. [Art]. diciembre 2010.
- [9] X. R. F. Vargas, Artist, *“El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos”*. [Art]. Universidad nacional de Colombia, ingeniería de investigación volumen 3 núm. 3, Bogotá, 2010.
- [10] j. J. c. Apaza, Artist, *“asfalto modificado con material reciclado de llantas para su aplicación en pavimentos flexibles”*. [Art]. tesis de pregrado, facultad de ingeniería civil y arquitectura escuela profesional de ingeniería civil, universidad nacional del altiplano, en puno pero, 2015.
- [11] L. Varón, Artist, *“Diseño de mezcla asfáltica de gradación tipo 1 (IDU) con asfalto modificado con grano de caucho reciclado (GCR) de MPI LTDA.”, manufacturas y*. [Art]. MPI LTDA, 2015.

- [12] I. L. J. R. A. Ramírez, Artist, "*diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho tecnología gap grade para la ciudad de Bogotá*". [Art]. Tesis de Postgrado, facultad de, 2014.
- [13] F. Fernández, Artist, "*Estudio de un asfalto con adición de caucho de neumático reciclado como polímero base, Chachapoyas – amazonas – 2017*". [Art]. Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería civil y Ambiental, Escuela profesional de ingeniería civil, Chachapoyas, Perú, 2019.
- [14] J. F. García, Artist, "*Influencia del triturado de restos de llantas como agregados en mezclas asfálticas*". [Art]. Tesis de Pregrado, Facultad de ingeniería civil, Universidad de Cartagena, Cartagena de indias DT Y C, Colombia, 2014.
- [15] D. Vega, Artist, "*Análisis del comportamiento a compresión de asfalto conformado por caucho reciclado de llantas como material constitutivo del pavimento asfáltico*". [Art]. Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador, 2016.
- [16] R. Fernández, «<https://ligante-asfaltico.blogspot.com>,» [En línea]. Available: <https://ligante-asfaltico.blogspot.com/p/llantas-usadas-en-pavimentos.html>.
- [17] N. Ramírez, Artist, "*Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco*". [Art]. tesis de pregrado, facultad de ingeniería civil, Universidad de Chile, Santiago de chile, 2016.
- [18] I. A. d. B. U. de los andes, Artist, "*Estudio de las mejoras mecánicas de las mezclas asfálticas con desechos de llantas*". [Art]. 2002.
- [19] L. V. y. R. R. M. A. Patiño, «Llantas usadas: materia prima para,» *Revista Untare*, p. 5, 2017.
- [20] J. M. X. V. E.A. Lemus, Artist, "*Estudio de mezclas asfálticas densas con adición de materiales alternativos*". [Art]. "Tesis de postgrado, Facultad de ingeniería, Tesis de postgrado, Facultad de ingeniería", 2018.
- [21] F. Goicochea, Artist, "*estudio de un asfalto con adición de caucho de neumático reciclado como polímero base, Chachapoyas – amazonas – 2017*". [Art]. Tesis de Pregrado, Facultad de ingeniería civil y ambiental, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas", Chachapoyas, Perú, 2019.
- [22] S. A. C. A. M. Dueñas, Artist, "*Recopilación y análisis sobre el uso del grano de caucho modificado (GCM) para la utilización por vía seca en el diseño de carpetas asfálticas en Bogotá*". [Art]. Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería Civil, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomas, Bogotá, Colombia, 2017.
- [23] O. G. C.D. Amado, Artist, "*Análisis del costo en el ciclo de vida para dos alternativas de pavimento*". [Art]. Tesis de postgrado, Facultad de ingeniería, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia, 2017.
- [24] O. Ramírez, Artist, "*Análisis comparativo del proyecto de norma de 044-16 con la especificación ido 560 – 11 y con el artículo invias 467-13 y la norma inv. – e – 824 -13 de*

*mezclas asfálticas con grano*

- de caucho mejorado*". [Art]. Tesis de Postgrado, Facultad de ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, 2016.
- [25] A. M. d. Bogotá, «Mezclas asfálticas Modificadas con caucho, Gestión,» 10 paginas.
- [26] D. Espinosa, Artist, "*Guía de mantenimiento para pavimentos asfálticos de vías locales en Bogotá D.C*". [Art]. Tesis de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia, 2009.
- [27] R. Pérez, Artist, "*Realidades y Percepciones del Uso de los Asfaltos Modificados en Colombia*". [Art]. Tesis de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, 2014.
- [28] F. R. N.E. Vargas, Artist, "*Diagnóstico de las condiciones superficiales y evaluación del comportamiento estructural del pavimento de las vías construidas por el instituto de desarrollo urbano con asfalto modificado con caucho reciclado de llanta GCR*". [Art]. Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, 2014.
- [29] A. L. I. L. R. J. P. Ramírez, Artist, "*Diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho tecnología gap graded para la ciudad de Bogotá*". [Art]. Tesis de postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia, 2014.